香日德–柴达木河流域水体氢氧稳定同位素特征及影响因素研究

何启欣[1,2,3]， 曹广超[2,3,4]， 曹生奎[1,2,3]， 程梦园[1,2,3]， 刁二龙[1,2,3]， 高斯远[1,2,3]，
邱巡巡[1,2,3]， 赵美亮[1,2,3]， 程 国[1,2,3]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室，
青海 西宁 810008；3. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；
4. 青海省人民政府–北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁 810008）

摘 要：利用香日德–柴达木河流域的湖水、河水、地下水、井水、雪等不同水体59组样品，室内测试样品δ^2H和δ^{18}O值并对其特征进行分析，探讨其影响因素、氘盈余值(*d*-excess)及河水沿程变化等。结果表明：(1) 香日德–柴达木河流域各水体氢氧同位素特征有差异，水循环过程中δ^{18}O的富集程度为：湖水 > 冰 > 地下水 > 河水 > 井水 > 雪，河水和地下水水力联系紧密，流域各水体中河水和湖水的蒸发作用最强。(2) 湖水δ^2H和δ^{18}O的最大值均在盆地底部的霍布逊湖，最小值均在上游东支河源冬给措纳湖，表明青藏高原北部湖水δ^2H和δ^{18}O比南部偏正，存在明显的高程效应。(3) 河水δ^2H和δ^{18}O之间存在较显著的线性关系$\delta^2H=4.93\delta^{18}O-29.6$（$R^2=0.97$），氢氧同位素组分的富集主要受控于河流蒸发的影响，河水上游蒸发作用最强，*d*-excess值偏大的原因可能为海拔高，气温低，空气湿度小。(4) 同一位置冰的氢氧稳定同位素较水贫化，是局部水汽反复蒸发凝结的结果。

关键词：氢氧同位素；氘盈余参数；大气降水线；同位素效应；香日德–柴达木河流域

氢氧稳定同位素作为自然界各类水体水循环的天然示踪剂，近年来被广泛用于研究降水水汽来源[1-3]、地下水利用与补给[4-5]、土壤水入渗与消耗[6-8]、地表水与地下水转化关系[9-11]、干旱区生态水文研究[12-14]等方面，成果诸多。随着气候变化加剧，对典型的高寒区柴达木盆地的水文研究较多，柴达木盆地位于青藏高原东北部，面积约2.5×10^5 km^2，属于高原大陆性荒漠气候，年降水量自东南部的200 mm递减到西北部的15 mm，年蒸发量由四周山区向盆地中心地带递增，在1200~3500 mm之间[15]。就整个柴达木盆地来看，该区域内同位素研究较为丰富，李劭宁等[16]采用同位素方法探究格尔木河地表水–地下水交互作用，崔亚莉等[17]利用^{3}H数据建立相应的数学物理模型，计算冲洪积扇不同位置地下水更新速率，并划分了当地的地下水流动系统，孔娜等[18]研究表明，柴达木盆地未来水量呈增加趋势，可保障柴达木循环经济试验区的水资源供给，徐凯[19]在前人针对柴达木盆地西部油田水的形成演化研究基础上，采用水化学特征与氢氧同位素地球化学特征结合，对具体的演化过程进行了研究。

香日德–柴达木河位于柴达木盆地东南部，是青海省重要的绿洲农业分布区和移民迁入区[20-21]，水资源是制约其农业发展、导致生态环境脆弱性加剧、降低移民迁入区环境承载力的重要因素[22-23]。目前，针对香日德–柴达木河流域水文水资源研究集中于生态用水[24]、蒸散发变化特征[25]、水资源地理数据库[26]、绿洲灌溉对地下水的影响及生态响应[22]、水资源系统生态风险的分析评价[23]和绿洲农业可持续性研究[20]等方面，该流域水体氢氧稳定同位素的研究较少。为实现流域水资源优化配置、供需动态平衡，迫切需要掌握香日德–柴达木河流域水文水资源特征，以解决区域发展和生态环境保护面临

收稿日期：2021-09-03； **修订日期**：2022-02-22
基金项目：青海省重大科技专项(2019-SF-A4-3)；青海省自然地理与环境过程重点实验室(2020-ZJ-Y06)
作者简介：何启欣(1995-)，女，硕士研究生，研究方向为自然地理与生态环境过程. E-mail: heqixin0504@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: Caoguangchao@qhnu.edu.cn

的诸多问题。本文对香日德–柴达木河流域6种水体59组水体样品进行氢氧同位素测试与分析,结合流域自然地理环境,探讨了研究区不同水体氢氧同位素含量与特征,包括高程效应、氘盈余参数以及河水沿程变化,目的在于为香日德–柴达木河流域水资源的可持续利用提供基础数据和科技支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

香日德–柴达木河发源于昆仑山布尔汗布达山(图1),全长250 km,属霍布逊湖水系,以降水补给为主,多年平均径流量4.53×10^{8} m^{3},河道平均比降6.76‰[27],河源海拔4846 m,河源分为东西两支,冬给措纳湖作为东支的天然调蓄湖泊,面积253 km^{2},冬给措纳湖以下至与西支汇合处称托索河;西支发源于内陆吞吐湖阿拉克湖,面积72 km^{2},阿拉克湖至与东支汇合处称乌兰乌苏郭勒(红水川);东西支汇合后称香日德河,河道出山口后逐渐潜入地下,于小夏滩完全干涸后转为地下潜流,在20 km处的小柴旦以泉的形式出露,转为地表水,称柴达木河(巴彦河),最终汇入盆地底部的霍布逊湖[28]。香日德–柴达木河流域气候类型为大陆性气候,温度日变化大,终年少雨多风,冬长夏短,四季不分明,高、寒、旱特征明显[24]。年均气温为2.7 ℃,年均降水量163.2 mm[29]。土壤自昆仑山下向北分布有沼泽土、草甸土、盐土、风沙土、灰棕漠土,呈现出扇形的分布形状。流域植被属荒漠半荒漠性质,稀疏矮小,根系发达且深入地下,覆盖度一般在25%以下,具有旱生盐生的生态特性。

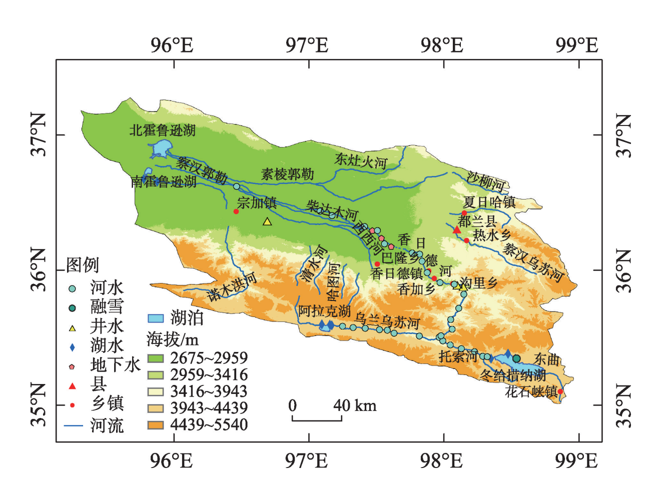


图1 研究区位置及采样点示意图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the sampling sites

1.2 样品采集

2020年11月下旬在流域内共采集湖水、河水、地下水、井水、冰、雪样品共计59组(图1),其中湖水样8组,河水样31组,冰样13组,地下水样、井水样各3组,雪样1组;湖水采集于距湖岸1 m的部位,河水采集于距河岸1 m、流速较快的河流中部,如河湖水样采样点结冰,则同时采集水样和冰样。现场使用多参数水质分析仪(AZ8302)测定气温、水温、TDS等指标。采集水样时,先将60 mL聚乙烯密封瓶用原水冲洗2~3遍,每个点采集2瓶重复水样,采集后使用PARAFILM膜密封,置于−4 ℃环境中冷藏至测定分析。

1.3 样品处理与分析

水样在测定前均经0.22 μm的滤膜过滤,水体氢氧同位素在青海湖湿地生态系统国家定位观测研究站采用液态水同位素分析仪LGR–2100测定[30],对δ^{2}H(δD)和δ^{18}O的分析精度分别为±0.8‰和±0.2‰,计算结果用维也纳标准平均海水(VSMOW)的千分差来表示,公式如下:

$$\delta^{2}\mathrm{H}=\left[(\mathrm{D/H})_{样品}/(\mathrm{D/H})_{\mathrm{VSMOW}}-1\right]\times 1000 \tag{1}$$

$$\delta^{18}\mathrm{O}=\left[\left({}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O}\right)_{样品}/\left({}^{18}\mathrm{O}/{}^{16}\mathrm{O}\right)_{\mathrm{VSMOW}}-1\right]\times 1000 \tag{2}$$

本文采用氘盈余衡量水中δ^{2}H和δ^{18}O的相对富集程度:d-excess=δ^{2}H−8δ^{18}O,氘盈余(d-excess)这个概念最早是由Dansgaard[31]提出的,反映了水的不平衡分馏以及蒸发速度,蒸发作用增强会导致d-excess值显示出偏正的变化,降水作用增强会导致d-excess值显示出偏负变化[32–33]。

2 结果与分析

青藏高原冬季受北风控制,采样期内在冬给措纳湖采集1次降雪,该降雪样点同位素正好落在章新平等[34]提出的德令哈站大气降水线(LMWL):δ^{2}H=5.86δ^{18}O−27.28上,故采用此降水线作为本文当地降水线。当地大气降水线的斜率和截距均小于全球大气降水线,则表示降雨过程中存在蒸发作用。

2.1 不同水体δ^{2}H-δ^{18}O关系

香日德–柴达木河流域59样品水体同位素组成中,δ^{2}H变化范围为−73.48‰~−148.90‰,变幅为

75.42‰，平均值为−110.67±13.79‰，$\delta^{18}O$变化范围为−7.80~−22.64，变幅为14.84‰，平均值为−16.41±2.59‰，可见香日德−柴达木河水体的$\delta^{18}O$比δ^2H更稳定。除雪样(1组)之外的所有水体d-excess值在8.10‰~34.44‰之间变化，变幅为26.35‰，平均值为21.15±6.63‰，超出全球平均氘盈余值11.15‰。各水体间氘盈余进行比较得出：湖水＞冰＞地下水＞河水＞井水＞雪，只有井水和雪的氘盈余值较为接近全球平均氘盈余值10‰，表明流域内这2种水体受蒸发作用影响最小。流域冬季气温低，湿度小，降水少，在降水过程中雨滴在经过干燥空气时会发生同位素的蒸发浓缩，导致氘盈余值高于全球平均氘盈余值。

通过分析流域水体氢氧稳定同位素的均值及变化范围(表1)，将它们的富集程度进行对比，河水、地下水和井水的$\delta^{18}O$和δ^2H值大于湖水和冰，d-excess值均低于湖水和冰；湖水、冰、河水、地下水和井水的$\delta^{18}O$、δ^2H和d-excess值有交叉关系，尤其是$\delta^{18}O$的均值十分接近，且标准差小，再次说明流域水体的$\delta^{18}O$比δ^2H更稳定，所以以$\delta^{18}O$来分析不同水体之间的水力联系。湖水和冰的$\delta^{18}O$均值与变化范围都非常接近，两者存在较紧密的补排关系，可能由于11月下旬河源与上游河段结冰，所采集冰样集中在上游河段，所以二者的水力联系较为强烈；河水与地下水$\delta^{18}O$的均值和变化范围同样非常接近，地下水$\delta^{18}O$的变化范围包含在河水变化范围之内，二者水力联系较强，原因为小夏滩区域的地下水本身就是上游河段的地下潜没形式。

2.2 湖水氢氧稳定同位素特征

在香日德−柴达木河流域上游东西两支的阿拉克湖、冬给措纳湖和流域尾闾霍布逊湖中共采集到8个湖水样品，其中δ^2H的变化范围在−83.58‰~−139.63‰之间，平均值为−116.98±21.09‰；$\delta^{18}O$的变化范围在−11.99‰~−21.63‰之间，平均值为−18.19±3.82‰，δ^2H和$\delta^{18}O$最大值均在流域尾闾的霍布逊湖，最小值均在河源冬给措纳湖。湖水氢氧同位素值与该湖的地理位置、气象条件、水源补给类型等因素密切相关[35]。其中湖水d-excess值变化范围为12.34‰~33.43‰，平均值为28.57±6.84‰，由图2可知，所有值都大于全球大气降水线氘盈余值(10‰)，表明局地蒸发水汽参与了水循环过程，冬季降水稀少蒸发强烈，容易出现湖面水体表面蒸发和二次蒸发，导致了氘盈余值的偏大。

已有研究表明，随着水的蒸发，水的盐度增高，则水中$\delta^{18}O$值也会增大。湖水的盐度与补给源的多少也有关系[36]，冬季入湖口处水量大大减小，补给作用微弱，河源两湖为淡水湖，且都为吞吐湖，水体更新速度大于霍布逊湖，所以湖水富集程度在整体上呈现出了阿拉克湖和冬给措纳湖小于霍布逊湖，表现出了较好的高程效应。本文研究河源两湖δ^2H和$\delta^{18}O$值相较霍布逊湖偏负，也与青藏高原北部湖水δ^2H与$\delta^{18}O$比南部偏正的结果一致[37]。

2.3 河水氢氧稳定同位素特征及氘盈余值分析

香日德−柴达木河流域是以降水为主要补给的，因而研究河流氢氧同位素与大气降水同位素之间的关系，可以较好地了解河流受大气降水补给的情况[38]。Craig[39]把大气降水中δ^2H和$\delta^{18}O$之间的关系定义为全球大气降水线(GMWL)，在全球尺度下有如下的关系：$\delta^2H=8\delta^{18}O+10$。流域河水样点集中在中上游，共采集31个河水样品，δ^2H和$\delta^{18}O$的变化范围分别为−91.88‰~−131.78‰和−12.92‰~−20.78‰，平均值分别为−107.87‰和−15.89‰。根据测定的结果，香日德−柴达木河流域河水δ^2H和$\delta^{18}O$之间存在较显著的线性关系：

表1 香日德−柴达木河流域氢氧稳定同位素比值

Tab. 1 Hydrogen-oxygen stable isotope ratio in the Xiangride-Qaidam River Basin

类型	样品个数	δ^2H/‰		$\delta^{18}O$/‰		d-excess/‰	
		均值±标准差	变化范围	均值±标准差	变化范围	均值±标准差	变化范围
湖水	8	−116.98±21.10	−139.63~−83.58	−18.19±3.38	−21.63~−11.99	28.57±6.84	12.34~33.43
冰	13	−119.23±12.04	−102.10~−148.90	−17.84±2.02	−22.64~−15.22	23.50±5.16	16.37~32.19
河水	31	−107.87±8.50	−131.78~−91.88	−15.89±1.70	−20.78~−12.92	19.14±5.40	9.88~34.44
地下水	3	−109.32±5.58	−101.57~−114.53	−16.34±0.93	−15.05~−17.20	21.32±1.85	18.83~23.10
井水	3	−99.36±7.17	−104.96~−89.24	−13.90±1.23	−14.86~−12.17	11.81±2.64	8.10~13.96
雪	1	−73.48	−	−7.80	−	−11.12	−

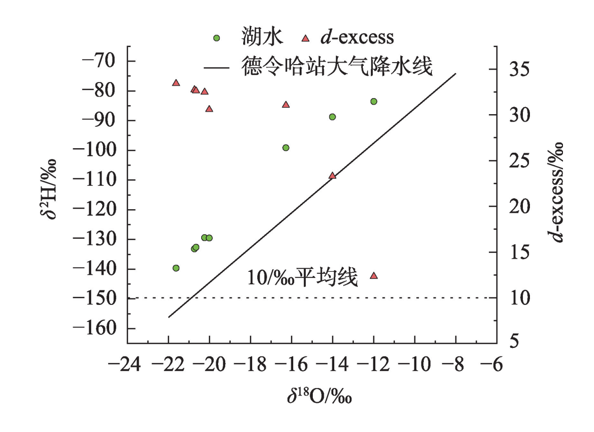


图2 湖水δ^2H与δ^{18}O的关系及*d*-excess变化

Fig. 2 Relationship between δ^2H and δ^{18}O and the variation of *d*-excess in lake water

河水蒸发线：$\delta^2H=4.93\delta^{18}O-29.6$（$R^2=0.97$，$P<0.05$）。

由图3可以看出，所有河水样点δ^2H和δ^{18}O值均落在中国大气降水线和当地大气降水线的上方，河水氢氧同位素关系的斜率为4.93，明显低于中国大气降水线斜率7.9（中国大气降水线：$\delta^2H=7.9\delta^{18}O+8.2$[40]），说明冬季该河流氢氧同位素组分的富集主要受控于河流蒸发的影响，河水在从高海拔的河源区到低海拔汇流区的过程中蒸发作用影响较大，使得河水蒸发线的斜率和截距与大气降水线产生了一定的偏移。且河水样点距离大气降水线较远，表明虽然香日德–柴达木河是受降水补给的，但在冬季受大气降水补给作用微弱。

张东升[41]研究表明，蒸发作用作为流域水文循环过程的主要影响因素时，水体的氘盈余参数值一般会大于全球大气降水线对应的*d*-excess值。流域河水氘盈余值变化范围为9.84‰~34.44‰，平均值为19.14‰，与青藏高原东部大气降水线对应的氘盈余（*d*-excess=19）值相近[42–43]，上游氘盈余值较下游相对分散且波动范围大，除了个别点落在10‰平均线上之外，其余值都大于全球大气降水线和中国大气降水线对应的氘盈余值。

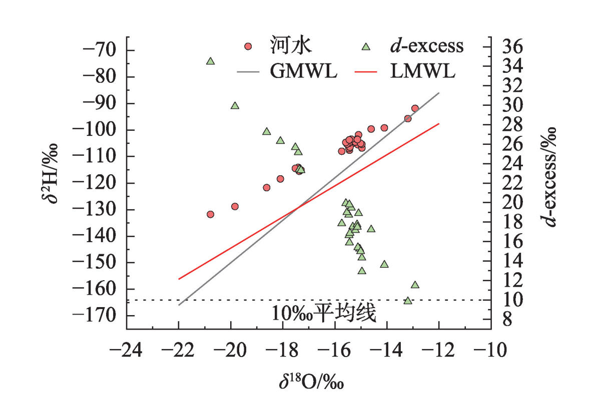


图3 河水δ^2H和δ^{18}O的关系及*d*-excess变化

Fig. 3 Relationship between δ^2H and δ^{18}O and the change of *d*-excess in the river water

河水氘盈余沿程变化如图4显示，整体变化为流域中游偏小，上下游较中游偏大。上游氘盈余值分散明显且偏大，两河源氘盈余均值达到28.57‰，原因或为上游海拔高，气温低，空气湿度小，蒸发强烈；中游较为开阔的水域在冬季蒸发作用减弱[44]，水体在一个相对开放的环境中，流速缓慢，使得河水氘盈余降低；在下游区域冬季径流量较小，此段河水是中游河水潜没地下后以泉水形式溢出转化的地表水，与相对富集的地下水等水体发生交互作用后更加富集，下游河水氘盈余值较中游逐渐增大。蒸发作用增强会导致*d*-excess值偏正变化[32–33]，上游河水蒸发作用最强。

以香日德–柴达木河河源东西两支的交汇点为

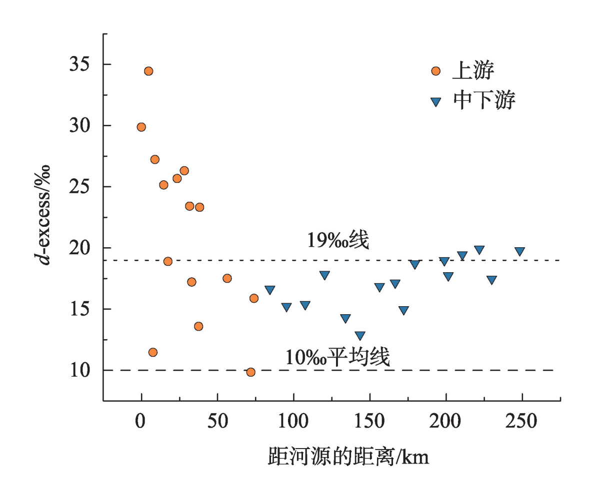


图4 香日德–柴达木河河水氘盈余沿程变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of deuterium excess parameter along the Xiangride-Qaidam River

界点将流域海拔分为大于3700 m和小于3700 m来分析河水δ^2H和δ^{18}O与高程的关系。由图5所示，河源东西两支未交汇之前，氢氧稳定同位素差异较大，交汇之后的δ^2H的值随着高程的升高而降低逐渐贫化，与高程之间存在高程效应但不明显，交汇之后的δ^{18}O与高程之间存在“反高程效应”但不明显，δ^{18}O的值随着高程的升高而增加。

2.4 水体蒸发线

研究区域水体蒸发线可以较好地反映各水体之间的补给关系和线性关系[12,44–47]，59组样品的δ^{18}O

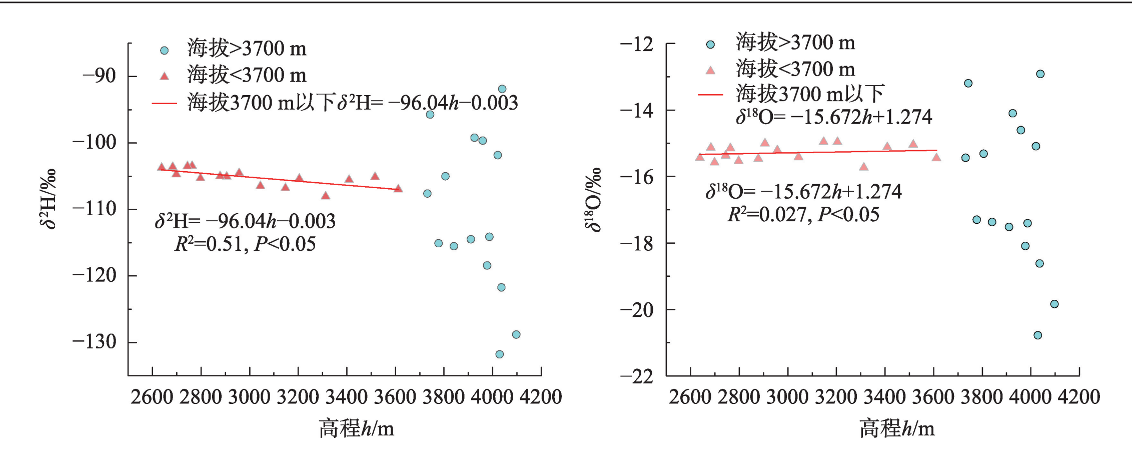


图5　香日德-柴达木河δ^2H与δ^{18}O与高程的关系

Fig. 5　Relationship between the δ^2H and δ^{18}O of the Xiangride-Qaidam River and the elevation

和δ^2H值拟合蒸发线方程为$\delta^2H=5.22\delta^{18}O-25.22$($R^2$=0.96),截距和斜率均小于全球大气降水线。整体来说显示出柴达木盆地香日德-柴达木河流域干旱且蒸发强烈的特点[48]。由图6可知,冬季流域水体参与区域性内部水汽再循环明显,仅有融雪点在当地大气降水线上,与河水和地下水距离较远,但河水和地下水水力联系紧密,说明冬季降雪对径流的补给作用非常小,冬季主要依靠源区湖泊调蓄,主要补给来源也是源区的湖泊水体;河水湖水作为开放性水体,蒸发作用相对强烈;地下水河水落在蒸发线上,湖水尤其是在霍布逊湖的湖水样在蒸发线上方。冬季流域δ^{18}O和δ^2H的主要影响因素是气温和蒸发作用,河源处海拔高,周围有高山阻挡,风速相对小,而终点处霍布逊湖处于盆地尾闾,地势平坦且为盐碱地环境,无植被生长,风速大,气温低,蒸

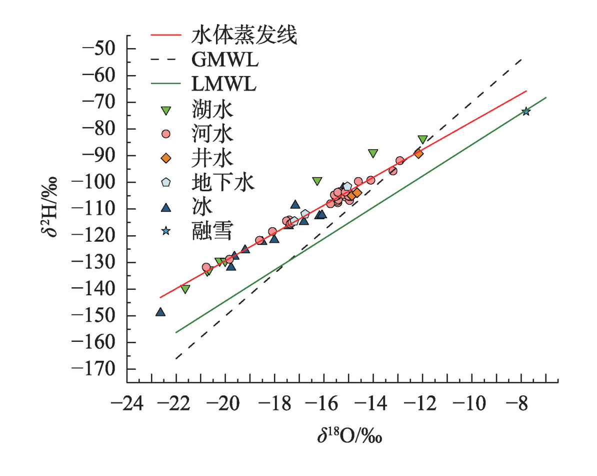


图6　不同水体δ^2H与δ^{18}O的关系及蒸发趋势线

Fig. 6　Relationship between δ^2H and δ^{18}O in different water bodies and the evaporation trend line

发分馏作用更加明显,而河源处的河水在流到终点处的过程中会不断的蒸发导致重同位素富集,在冬季由于降水等补给较少,这也导致了终点处重同位素的富集。地下水为河水入渗,溢出后河水继续受地下水补给,所以受蒸发作用程度和河水接近。

2.5　冰氢氧稳定同位素特征及冰-水转化关系

采样过程中如遇到结冰现象,即同时采集该点的冰样品和水样品,共采集12组。冰氢氧稳定同位素组成中,冰样的δ^2H与δ^{18}O的变化范围分别为−102.10‰~−148.90‰和−15.22‰~−22.64‰,均值分别为−119.23‰和−17.84‰,水氢氧稳定同位素组成中,水样的δ^2H与δ^{18}O的变化范围分别为−83.58‰~−128.82‰和−11.99‰~−19.84‰,均值分别为−106.27‰和−15.91‰,2种水体的氢氧稳定同位素值均较湖水富集,氧同位素方差明显小于氢同位素,说明δ^{18}O比δ^2H更稳定。由图7可知,冰与水样点全部落在当地大气降水线的左上方,表示在参与局地水气循环的过程中受到了不同程度的蒸发作用,冰氢氧同位素较水氢氧同位素贫化,表明河道内河水凝聚时,冰中富集δ^{18}O比δ^2H的程度取决于结冰的速率,但水和冰不一定处于平衡状态,此过程存在反复的蒸发凝聚,所以形成的冰相较水贫化。

3　结　论

(1)香日德-柴达木河流域各水体氢氧同位素特征有差异,水循环过程中δ^{18}O的富集程度为:湖水>冰>地下水>河水>井水>雪,河水和地下水水力联系紧密,流域各水体中河水和湖水的蒸发作

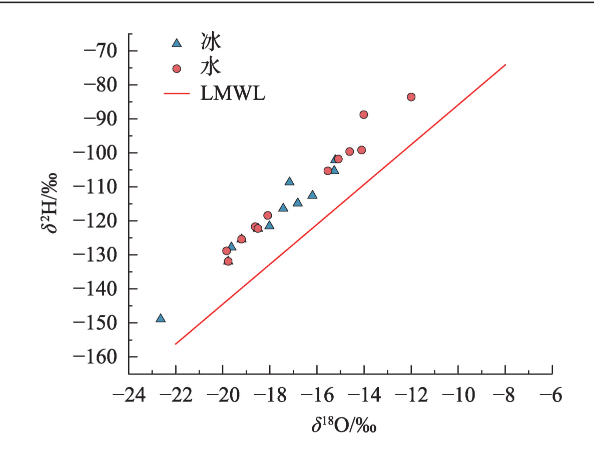


图7　同一位置冰-水δ^2H与$\delta^{18}O$关系

Fig. 7　Relationship between δ^2H and $\delta^{18}O$ in ice-water at the same location

用最强。

（2）湖水δ^2H和$\delta^{18}O$的最大值均在盆地底部的霍布逊湖，最小值均在上游东支河源冬给措纳湖，表明青藏高原北部湖水δ^2H和$\delta^{18}O$比南部偏正，存在明显的高程效应。

（3）河水δ^2H和$\delta^{18}O$之间存在较显著的线性关系$\delta^2H=4.93\delta^{18}O-29.6$（$R^2=0.97$），氢氧同位素组分的富集主要受控于河流蒸发的影响，冬季受降水补给作用弱，河水高程效应不明显；河水上游蒸发作用最强，氘盈余值偏大的原因或为海拔高，气温低，空气湿度小。

（4）同一位置的冰水δ^2H-$\delta^{18}O$关系来看，冰的氢氧稳定同位素较水贫化，是局部水汽反复蒸发凝结的结果。

参考文献(References)：

[1]　檀康达, 王仕琴, 郑文波. 基于卫星降水产品的华北北纬38°带降水氢氧同位素时空特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 1951−1962. [Tan Kangda, Wang Shiqin, Zheng Wenbo. Spatial and temporal variations of hydrogen and oxygen isotopes and sources of water vapour indicated from satellite precipitation products along the transection of 38° north latitude in North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 1951−1962.]

[2]　徐秀婷. 石羊河流域降水氢氧同位素的区域差异及水汽来源分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020. [Xu Xiuting. Analyses of Regional Differences of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Precipitation and Vapor Sources in Shiyang River Basin[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.]

[3]　徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 等. 乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 155−165. [Xu Xiuting, Jia Wenxiong, Zhu Guofeng, et al. Stable isotope characteristics and vapor source of precipitation in the South and North slopes of Wushaoling Mountain[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 155−165.]

[4]　张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4924−4935. [Zhang Hongxin, Wu Ya, Luo Weiyu, et al. Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4924−4935.]

[5]　郑扬帆. 利用稳定同位素方法分析地下水补给来源[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(14): 153−154. [Zheng Yangfan. Analysis of Groundwater recharge sources by stable isotope[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016(14): 153−154.]

[6]　姬王佳, 黄亚楠, 李冰冰, 等. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下土壤水氢氧稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4143−4149. [Ji Wangjia, Huang Yanan, Li Bingbing, et al. Oxygen and hydrogen stable isotope compositions of soil water in deep loess profile under different land use types of northern Shaanxi, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4143−4149.]

[7]　王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495−501. [Wang Shiqin, Song Xianfang, Xiao Guoqiang, et al. Appliance of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 495−501.]

[8]　邢星, 陈辉, 朱建佳, 等. 柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6277−6286. [Xing Xing, Chen Hui, Zhu Jianjia, et al. Water sources of five dominant desert plant species in Nuomuhong area of Qaidam Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6277−6286.]

[9]　杨艳林, 靖晶, 赵永波, 等. 基于氢氧稳定同位素的武汉北部新城地表水-地下水转换关系研究[J/OL]. 中国地质: 1−12[2021−04−22].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P. 20210419.1413.012.html. [Yang Yanlin, Jing Jing, Zhao Yongbo, et al. Conversion relationship between surface water and groundwater based on stable isotopes of D and ^{18}O of new town in the northern Wuhan, Hubei [J/OL]. Geology in China: 1−12 [2021−04−22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P. 20210419.1413.012.html.]

[10]　孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4202−4210. [Kong Xiaole, Yang Yonghui, Cao Bo, et al. Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4202−4210.]

[11]　雷义珍, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖沙柳河流域不同时期地表水与地下水的相互作用[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2528−2538. [Lei Yizhen, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Study on

surface water and groundwater interaction of Shaliu River Basin in Qinghai Lake in different periods[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2528−2538.]

[12] 陈定帅, 高磊, 彭新华, 等. 干旱半干旱区土壤水稳定性氢氧同位素混合模型研究[J]. 土壤, 2018, 50(1): 190−194. [Chen Dingshuai, Gao Lei, Peng Xinhua, et al. Hydrogen and oxygen isotope mixing model of soil water in arid and semiarid region[J]. Soils, 2018, 50(1): 190−194.]

[13] 曾帝, 吴锦奎, 李洪源, 等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 857−869. [Zeng Di, Wu Jinkui, Li Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: A review[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4):857−869.]

[14] 刘杨民, 张明军, 王圣杰, 等. 基于GCM的西北干旱区降水稳定氢氧同位素年际变化模拟[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 260−267, 277. [Liu Yangmin, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Interannual variation of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in arid Northwest China based on GCMs[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 260−267, 277.]

[15] 郭任宏. 柴达木盆地平原区蒸散量及浅层地下水的分布特征[D]. 北京: 中国地质大学, 2015. [Guo Renhong. Distribution of Evapotranspiration and Shallow Groundwater in Plain Area over Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.]

[16] 李劭宁, 贾晓鹏. 格尔木河^{222}Rn同位素变化及其对地表水−地下水交互关系的指示意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1190−1199. [Li Shaoning, Jia Xiaopeng. Variability of ^{222}Rn in Golmud River and its implication for surface-groundwater interaction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1190−1199.]

[17] 崔亚莉, 刘峰, 郝奇琛, 等. 诺木洪冲洪积扇地下水氢氧同位素特征及更新能力研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 1−7. [Cui Yali, Liu Feng, Hao Qichen, et al. Hydrogen and oxygen isotope characteristics and renewal capacity of groundwater in Nomukhong alluvial fan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 1−7.]

[18] 孔娜, 渠涛, 谭红兵, 等. 柴达木盆地河流同位素分布特征及径流变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 948−954. [Kong Na, Qu Tao, Tan Hongbing, et al. Isotope distribution characteristics and runoff changes of rivers in the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 948−954.]

[19] 徐凯. 柴达木盆地南翼山油田水的水化学与氢氧同位素地球化学特征[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2021. [Xu Kai. Water Chemistry and Hydrogen-Oxygen Isotope Geochemistry of Oil Field Water in the South Wing of the Qaidam Basin[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[20] 康国飞. 绿洲农业区可持续性综合研究[D]. 北京:北京林业大学, 2004. [Kang Guofei. General Sustainability Study of Oasis Agricultural Area-Case Study, Xiangride Oasis, Qinhgai Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.]

[21] 费俊亮, 贾绍凤, 朱文彬. 香日德农场异地扶贫移民对迁入地的适应性评价[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 58−62. [Fei Junliang, Jia Shaofeng, Zhu Wenbin. The adaptability evaluation of poverty reduction off-site migrants in Xiangride farm to resettlement[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2010, 31(4): 58−62.]

[22] 毛军. 柴达木盆地香日德绿洲灌溉对地下水的影响及生态响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Mao Jun. Study on the Impact of Irrigation on Groundwater and its Ecological Response of Xiangride Oasis in Qaidum Basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]

[23] 韩晓卓, 李自珍, 张克斌, 等. 水资源系统生态风险的分析与评价——以香日德绿洲地区为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 113−118. [Han Xiaozhuo, Li Zizhen, Zhang Kebin, et al. Ecological risk analysis and evaluation of water resources system: A case study of Xiangride oasis[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 113−118.]

[24] 吴学琴. 香日德河流域生态用水研究[D]. 西宁: 青海大学,2017. [Wu Xueqin. Studyon Ecological Water Use in Xiangride River Basin[D]. Xining: Qinghai University, 2017.]

[25] 吴学琴, 李若东, 管吕军. 香日德河流域近53年ET−0变化特征[J]. 青海大学学报, 2017, 35(1): 45−50. [Wu Xueqin, Li Ruodong, Guan Lvjun. The characteristics of potential evapotranspiration of Xiangride River Basin in the 53 years[J]. Journal of Qinghai University, 2017, 35(1): 45−50.]

[26] 林时君, 贾绍凤. 香日德河流域水资源地理数据库的构建与应用[J]. 广东水利水电, 2010(8): 43−45. [Lin Shijun, Jia Shaofeng. Xiangride River Basin water resources construction and application of geographic data base[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(8): 43−45.]

[27] 张家好. 香日德−诺木洪山前平原地区地下水资源评价[D]. 北京:中国地质大学, 2013. [Zhang Jiahao. Groundwater Resource Evaluation of Xiangride-Nuomuhong Piedmont Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.]

[28] 王晓娟. 柴达木盆地水资源优化配置[D]. 西安: 长安大学, 2019. [Wang Xiaojuan. Optimal Allocation of Water Resources in Qaidam Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.]

[29] 毛军, 贾绍凤, 张克斌. FEFLOW软件在地下水数值模拟中的应用——以柴达木盆地香日德绿洲为例[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 44−48. [Mao Jun, Jia Shaofeng, Zhang Kebin. Application of FEFLOW software in numerical groundwater simulation: An example of Xiangrid oasis in the Qaidam Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(4): 44−48.]

[30] 冉屹立, 熊育久, 赵文利, 等. 氢氧同位素测量差异及误差来源分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(1): 176−181. [Ran Yili, Xiong Yujiu, Zhao Wenli, et al. Study on the consistence between stable hydrogen and oxygen isotopes measured by different equipment and methods[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1): 176−181.]

[31] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436–468.

[32] 房丽晶, 高瑞忠, 贾德彬, 等. 内蒙古草原巴拉格尔河流域不同水体转化特征及环境驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 860–868. [Fang Lijing, Gao Ruizhong, Jia Debin, et al. Characteristics and environmental driving factors of water transformation in the Balaguer River watershed of Inner Mongolia steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 860–868.]

[33] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 西北地区降水稳定同位素的云下二次蒸发效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 109–118. [Liu Jieyao, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Influence of below-cloud secondary evaporation on stable isotope composition in precipitation in Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 109–118.]

[34] 章新平, 姚檀栋. 青藏高原东北地区现代降水中δ^2H与δ^{18}O的关系研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 74–79. [Zhang Xinping, Yao Tandong. Relations between δ^2H and δ^{18}O in precipitation at present in the Northeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 74–79.]

[35] 崔蕊, 汪季, 张成福, 等. 吉兰泰盐湖氢氧同位素及湖水来源分析[J]. 内蒙古林业科技, 2019, 45(1): 17–21. [Cui Rui, Wang Ji, Zhang Chengfu, et al. Analysis on hydrogen and oxygen isotopes and lake water source in Girantai Saline Lake[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2019, 45(1): 17–21.]

[36] Liu Weiguo, Li Xiangzhong, Zhang Ling, et al. Evaluation of oxygen isotopes in carbonate as an indicator of lake evolution in arid areas: The modern Qinghai Lake, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chemical Geology, 2009, 268(1–2): 126–136.

[37] 冯盛楠, 刘兴起, 李华淑. 中国西部湖泊水体δ^2H与δ^{18}O的空间变化特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1199–1211. [Feng Shengnan, Liu Xingqi, Li Huashu. Spatial variations of δ^2H and δ^{18}O in lake water of western China and their controlling factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 1199–1211.]

[38] 秦欢欢, 高柏, 陈益平, 等. 拉萨河夏季氢氧同位素空间分布特征及分析[J]. 地球与环境, 2021, 49(3): 277–284. [Qin Huanhuan, Gao Bai, Chen Yiping, et al. Spatial distribution of hydrogen and oxygen isotopes in Lhasa River in summer and the implications[J]. Earth and Environment, 2021, 49(3): 277–284.]

[39] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702–1703.

[40] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801–806. [Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Study on the hydrogen and oxygen stable isotopes in meteoric precipitation of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801–806.]

[41] 张升东. 基于环境同位素的锦绣川流域水循环规律研究[D]. 济南: 济南大学, 2013. [Zhang Dongsheng. Study on Water Cycle Regularity Based on Envrionmental Isotope in Jinxiuchuan Basin[D]. Jinan: University of Jinan, 2013.]

[42] 于津生, 张鸿斌, 虞福基, 等. 西藏东部大气降水氧同位素组成特征[J]. 地球化学, 1980(2): 113–121. [Yu Jinsheng, Zhang Hongbin, Yu Fuji, et al. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Xizang[J]. Geochimica, 1980(2): 113–121.]

[43] 田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部水蒸发过程中的氧稳定同位素变化[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 159–164. [Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, et al. Study on stable isotope fractionation during water evaporation in the middle of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 159–164.]

[44] 王贺, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵沟壑区不同水体间转化特征——以韭园沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 19–25. [Wang He, Li Zhanbin, Ma Bo, et al. Characteristics of waters transformation in the hilly and gully regions of the Loess Plateau: A case study of the Jiuyuangou Watershed [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(3): 19–25.]

[45] 喻生波, 屈君霞. 苏干湖盆地地下水氢氧稳定同位素特征及其意义[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35 (1): 169–175. [Yu Shengbo, Qu Junxia. Characteristics and significance of stable hydrogen and oxygen isotopes in groundwater of Sugan Lake basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1): 169–175.]

[46] 刘芳, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡水体氢氧稳定同位素特征研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1116–1123. [Liu Fang, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Hydrogen and oxygen isotope characteristics of water bodies on the southern slope of the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1116–1123.]

[47] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2784–2790. [Zhu Jianjia, Chen Hui, Gong Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2784–2790.]

[48] 胡海英, 包为民, 王涛, 等. 水体蒸发中瑞利分馏公式的模拟及实验验证[J]. 水利学报, 2007(增刊): 314–317. [Hu Haiying, Bao Weimin, Wang Tao, et al. Derivation of rayleigh fractionation formula and its experiment study in water evaporation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Suppl.): 314–317.]

Hydrogen-oxygen isotope characteristics of water bodies in the Xiangride-Qaidam River Basin and its influencing factors

HE Qixin[1,2,3], CAO Guangchao[2,3,4], CAO Shengkui[1,2,3], CHENG Mengyuan[1,2,3], DIAO Erlong[1,2,3], GAO Siyuan[1,2,3], QIU Xunxun[1,2,3], ZHAO Meiliang[1,2,3], CHENG Guo[1,2,3]

(1. School of Geographical Science of Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, Qinghai, China; 3. MOE Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Xining 810008, Qinghai, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: In this paper, 59 sets of samples from different water bodies such as lake water, river water, groundwater, well water, and snow in the Xiangride-Qaidam River Basin were used to measure δ^2H and δ^{18}O of indoor samples; analyze their characteristics; and explore their influencing factors, deuterium excess parameter values, and river water variation along the river. Results show that (1) the hydrogen and oxygen isotope characteristics of the water bodies in the Xiangride-Delta River Basin are different. In addition, the enrichment of δ^{18}O during water cycle is presented in the following order: lake water > ice > groundwater > river water > well water > snow. River water and groundwater are closely linked hydraulically, and the evaporation of river water and lake water is the strongest among the water bodies in the basin. (2) The maximum values of lake water δ^2H and δ^{18}O are observed in Hobson Lake at the bottom of the basin, and the minimum values are observed in the upper east branch of the river water collected from winter to the wrong lake. It shows that the δ^2H and δ^{18}O of lake water in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau are more positive than those in the south, and there is an obvious elevation effect. (3) Moreover, a significant linear relationship is found between river water δ^2H and δ^{18}O: $\delta^2\text{H} = 4.93\ \delta^{18}\text{O} - 29.6$ (R^2=0.97). The enrichment of hydrogen and oxygen isotope components is primarily controlled by the influence of river evaporation; strong evaporation effect in the upper reaches of the river; and high deuterium excess caused by high altitude, low temperature, and low air humidity. (4) Compared with water, the depletion of hydrogen and oxygen-stable isotopes in ice at the same location results from repeated evaporation and condensation of local water vapor.

Keywords: hydrogen and oxygen isotope; deuterium excess parameter; precipitation line; isotopic effect; Xiangride-Qaidam River Basin